

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号
特開2002-40496
(P2002-40496A)

(43) 公開日 平成14年2月6日 (2002.2.6)

(51) IntCl. ⁷	識別記号	F I	テグコード (参考)
G 0 2 F 1/35	5 0 1	G 0 2 F 1/35	5 0 1 2 K 0 0 2
H 0 1 S 3/06		H 0 1 S 3/06	B 5 F 0 7 2
		3/23	5 K 0 0 2
		3/30	Z
H 0 4 B 10/17		H 0 4 B 9/00	J

審査請求 有 請求項の数14 OL (全 11 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2000-224154(P2000-224154)

(22) 出願日 平成12年7月25日 (2000.7.25)

(71) 出願人 000002130

住友電気工業株式会社

大阪府大阪市中央区北浜四丁目5番33号

(72) 発明者 津崎 哲文

神奈川県横浜市栄区田谷町1番地 住友電気工業株式会社横浜製作所内

(72) 発明者 西村 正幸

神奈川県横浜市栄区田谷町1番地 住友電気工業株式会社横浜製作所内

(74) 代理人 100088155

弁理士 長谷川 芳樹 (外3名)

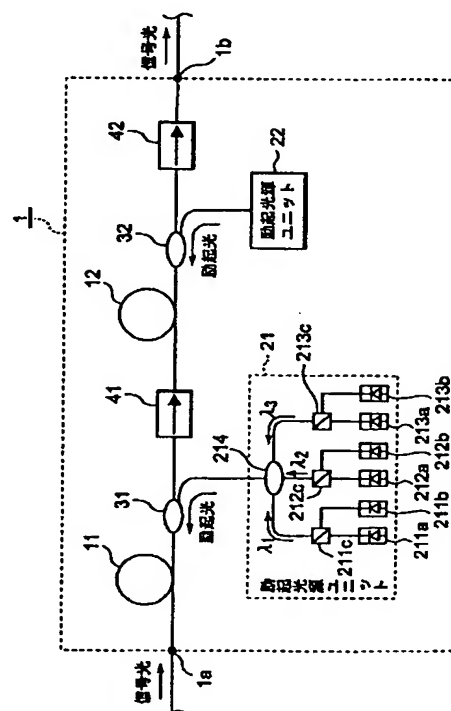
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 ラマン増幅器及びそれを用いた光伝送システム

(57) 【要約】

【課題】 非線型光学効果による信号光の伝送品質の劣化が抑制される集中定数型のラマン増幅器、及びそれを用いた光伝送システムを提供する。

【解決手段】 入力端1aから入力された信号光を伝送するとともに、励起光源ユニット21、22から供給される励起光によって信号光をラマン増幅するためのラマン増幅器1内の光伝送路を、2つのラマン増幅用光ファイバ11、12を直列に接続して構成するとともに、それらの波長分散をそれぞれ異なる値とする。この構成によれば、ラマン増幅用光ファイバ11、12の波長分散値の組合せなどを利用して、増幅器1内での波長分散を制御することができる。これによって、信号光への分散の累積や零分散近傍での信号光の伝送などを防止して、非線型光学効果による信号光の伝送品質の劣化が抑制される。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】 所定の増幅波長帯域内にある信号光を励起光によってラマン増幅する集中定数型のラマン増幅器であって、

互いに直列に接続され、前記増幅波長帯域内にある前記信号光をそれぞれラマン増幅するとともに、互いに異なる波長分散値を有する複数のラマン増幅用光ファイバと、

前記複数のラマン増幅用光ファイバのそれぞれに前記励起光を供給する 1 または複数の励起光供給手段とを備えることを特徴とするラマン増幅器。

【請求項 2】 前記増幅波長帯域内の少なくとも一部の波長帯域において、前記複数のラマン増幅用光ファイバでの前記波長分散値を入力端から出力端まで累積した分散値の絶対値が、 0.5 ps/nm 以下であることを特徴とする請求項 1 記載のラマン増幅器。

【請求項 3】 前記増幅波長帯域内の全体の波長帯域において、前記複数のラマン増幅用光ファイバでの前記波長分散値を入力端から出力端まで累積した分散値の絶対値が、 5.0 ps/nm 以下であることを特徴とする請求項 1 記載のラマン増幅器。

【請求項 4】 前記増幅波長帯域内の全体の波長帯域において、前記複数のラマン増幅用光ファイバでの前記波長分散値を入力端から任意の位置まで累積した分散値の絶対値が、各位置に対して 30 ps/nm 以下であることを特徴とする請求項 1 記載のラマン増幅器。

【請求項 5】 前記複数のラマン増幅用光ファイバのそれぞれにおける分散スロープ値が、 $-0.5 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ 以上 $0.1 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ 以下であることを特徴とする請求項 1 記載のラマン増幅器。

【請求項 6】 前記複数のラマン増幅用光ファイバは、互いに異なる符号の前記波長分散値を有する 2 つのラマン増幅用光ファイバを少なくとも含むことを特徴とする請求項 1 記載のラマン増幅器。

【請求項 7】 前記複数のラマン増幅用光ファイバは、2 つのラマン増幅用光ファイバからなるとともに、その一方の前記波長分散値が正、他方の前記波長分散値が負に構成されていることを特徴とする請求項 6 記載のラマン増幅器。

【請求項 8】 前記増幅波長帯域内の全体の波長帯域において、前記複数のラマン増幅用光ファイバのそれぞれでの前記波長分散値の絶対値が、所定の波長分散下限値以上であることを特徴とする請求項 1 記載のラマン増幅器。

【請求項 9】 前記複数のラマン増幅用光ファイバのそれぞれは、互いに異なるレイリー散乱係数を有することを特徴とする請求項 1 記載のラマン増幅器。

【請求項 10】 前記複数のラマン増幅用光ファイバのうち、最も小さい前記レイリー散乱係数を有するラマン増幅用光ファイバが、最も入力端側の位置に設置されて

いることを特徴とする請求項 9 記載のラマン増幅器。

【請求項 11】 前記複数のラマン増幅用光ファイバのそれぞれの長さが、 5 km 以下であることを特徴とする請求項 1 記載のラマン増幅器。

【請求項 12】 前記複数のラマン増幅用光ファイバの少なくとも 1 つは、前記励起光の波長での実効断面積が $15 \mu\text{m}^2$ 以下であることを特徴とする請求項 1 記載のラマン増幅器。

【請求項 13】 前記複数のラマン増幅用光ファイバのうち、最も大きい非線型定数を有するラマン増幅用光ファイバが、前記励起光供給手段から前記励起光が供給される位置に最も近い位置に設置されていることを特徴とする請求項 1 記載のラマン増幅器。

【請求項 14】 信号光が伝送される光ファイバを用いて構成された光伝送路を有するとともに、前記光伝送路を伝送される前記信号光を中継する中継局内に、請求項 1 記載のラマン増幅器が設置されていることを特徴とする光伝送システム。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、信号光を励起光によってラマン増幅するラマン増幅器、及びそれを用いた光伝送システムに関するものである。

【0002】

【従来の技術】光ファイバ増幅器は、光伝送システムで光ファイバ伝送路を伝送される信号光に対して、光伝送路での伝送損失を補償すべく信号光を光増幅するものである。光伝送路上に設置される光ファイバ増幅器は、光伝送路としても機能する光増幅用光ファイバと、光増幅用光ファイバへと励起光を供給する励起光供給手段とを備えて構成される。そして、励起光が供給されている光増幅用光ファイバに信号光が入力されると、その信号光は、光増幅用光ファイバにおいて光増幅されて出力される。

【0003】このような光ファイバ増幅器としては、Er（エルビウム）などの希土類元素を添加する希土類元素添加ファイバ増幅器と、誘導ラマン散乱によるラマン増幅現象を利用するラマン増幅器とが用いられている。

【0004】ここで、希土類元素添加ファイバ増幅器

（例えば EDFA：Erbium-Doped Fiber Amplifier、Er 添加ファイバ増幅器）は、希土類元素を添加した光ファイバ（例えば EDF：Erbium-Doped Fiber、Er 添加光ファイバ）を光増幅用光ファイバとして用いたもので、モジュール化されて光伝送システムの中継局内などに設置される。一方、ラマン増幅器においては、光ファイバ伝送路を構成している石英系の光ファイバが、ラマン増幅用光ファイバとして用いられる。

【0005】

【発明が解決しようとする課題】上記したラマン増幅器は、光伝送用の光ファイバに信号光とともに励起光を入

10

20

30

40

50

力し、ラマン増幅によって伝送損失を補償する分布定数型の光増幅器として構成することができる。また、EDFAなどと同様に、光伝送路上で中継局内などの所定位置に設置し、入力信号光を所定の利得 (net gain) で光増幅して出力信号光を得る集中定数型の光増幅器として利用することも可能である。

【0006】しかしながら、ラマン増幅器を集中定数型の光増幅器として利用する場合、EDFAなどに比べて、光増幅に必要なラマン増幅用光ファイバの長さが長い場合、自己位相変調や四光波混合などの非線型光学効果の影響が大きくなる。このため、ラマン増幅用光ファイバでの非線型光学効果による信号光の伝送品質の劣化が顕著となるとという問題を生じる。

【0007】本発明は、以上の問題点に鑑みてなされたものであり、非線型光学効果による信号光の伝送品質の劣化が抑制される集中定数型のラマン増幅器、及びそれを用いた光伝送システムを提供することを目的とする。

【0008】

【課題を解決するための手段】このような目的を達成するために、本発明によるラマン増幅器は、(1) 所定の増幅波長帯域内にある信号光を励起光によってラマン増幅する集中定数型のラマン増幅器であって、(2) 互いに直列に接続され、増幅波長帯域内にある信号光をそれぞれラマン増幅するとともに、互いに異なる波長分散値を有する複数のラマン増幅用光ファイバと、(3) 複数のラマン増幅用光ファイバのそれぞれに励起光を供給する1または複数の励起光供給手段と、を備えることを特徴とする。

【0009】単一のラマン増幅用光ファイバを用いて構成された集中定数型のラマン増幅器においては、その構成から増幅器モジュール内で波長分散を制御することができない。したがって、ラマン増幅用光ファイバの波長分散の値により、ラマン増幅用光ファイバを伝送される間に信号光に累積される分散値が大きくなったり、あるいは、零分散に近い状態で信号光がラマン増幅用光ファイバを伝送されるなどの光伝送条件を生じる場合がある。

【0010】このとき、信号光の分散値が大きくなる場合には、自己位相変調 (SPM: Self Phase Modulation) や群速度分散 (GVD: Group Velocity Dispersion) などが発生する原因となる。また、信号光が零分散近傍で伝送される場合には、交差位相変調 (XPM: Cross Phase Modulation) や四光波混合 (FWM: Four Wave Mixing) などが発生する原因となる。そして、ラマン増幅用光ファイバでの伝送中にこれらの非線型光学効果等を生じると、その影響によって信号光の伝送品質が劣化してしまう。

【0011】これに対して、上記したラマン増幅器においては、直列に接続した複数のラマン増幅用光ファイバを用いて集中定数型のラマン増幅器を構成するととも

に、それらの波長分散値をそれぞれ異なる値としている。これによって、増幅器内の光伝送路で波長分散を制御して、信号光への分散の累積や零分散近傍での伝送を低減することが可能となる。したがって、非線型光学効果による増幅器内での信号光の伝送品質の劣化が抑制されるラマン増幅器が実現される。

【0012】また、増幅波長帯域内の少なくとも一部の波長帯域において、複数のラマン増幅用光ファイバでの波長分散値を入力端から出力端まで累積した分散値の絶対値が、 0.5 ps/nm 以下であることを特徴とする。

【0013】あるいは、増幅波長帯域内の全体の波長帯域において、複数のラマン増幅用光ファイバでの波長分散値を入力端から出力端まで累積した分散値の絶対値が、 5.0 ps/nm 以下であることを特徴とする。

【0014】ラマン増幅器内の光伝送路全体としての累積された分散値を、ラマン増幅用光ファイバの波長分散値の組合せによって補償して上記の範囲内とすることによって、それぞれ波長分散値の異なる複数のラマン増幅用光ファイバが接続された光ファイバ伝送路の全体として、波長分散が十分に補償された構成とすることができる。したがって、SPMやGVDの発生による信号光の伝送品質の劣化が抑制される。

【0015】また、増幅波長帯域内の全体の波長帯域において、複数のラマン増幅用光ファイバでの波長分散値を入力端から任意の位置まで累積した分散値の絶対値が、各位置に対して 3.0 ps/nm 以下であることが好ましい。

【0016】ラマン増幅器内の光伝送路全体としての分散値が上記のように補償されている場合においても、入力端から出力端までの光伝送路上で分散値が過度に大きくなることがあると、SPMやGVDによる信号光の伝送品質の劣化の原因となる。これに対して、光伝送路上の各位置に対して、その位置までに累積された分散値を常に上記の範囲内とすることによって、そのような伝送品質の劣化を抑制することができる。

【0017】さらに、複数のラマン増幅用光ファイバのそれぞれにおける分散スロープ値が、 $-0.5 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ 以上 $0.1 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ 以下であることが好ましい。このように、分散スロープ値を十分に小さい値としておけば、増幅波長帯域の全体に対して、十分に波長分散を補償することが可能となる。

【0018】また、複数のラマン増幅用光ファイバは、互いに異なる符号の波長分散値を有する2つのラマン増幅用光ファイバを少なくとも含むことを特徴とする。

【0019】このように逆符号の波長分散値を有するラマン増幅用光ファイバを用いれば、波長分散値の絶対値がある程度の大きさであっても、逆符号の波長分散値の組合せによって全体として波長分散を補償することができる。これによって、信号光の零分散近傍での伝送を極

力避けることが可能となり、XPMやFWMの発生による信号光の伝送品質の劣化が抑制される。

【0020】具体的な構成としては、例えば、複数のラマン増幅用光ファイバは、2つのラマン増幅用光ファイバからなるとともに、その一方の波長分散値が正、他方の波長分散値が負に構成されているものがある。このような構成によれば、特に簡単なラマン増幅用光ファイバの構成によって波長分散を補償して、信号光の伝送品質の劣化の抑制を実現することができる。

【0021】また、増幅波長帯域内の全体の波長帯域において、複数のラマン増幅用光ファイバのそれぞれでの波長分散値の絶対値が、所定の波長分散下限値以上であることを特徴とする。このように波長分散値に下限値を与えることによって、零分散近傍の波長分散値を有する光ファイバを除外して、増幅器内の光伝送路における零分散近傍での信号光の伝送を防止することができる。波長分散下限値については、例えば、絶対値が 0.5 ps/nm/km 以上とすることが好ましい。

【0022】また、複数のラマン増幅用光ファイバのそれぞれは、互いに異なるレイリー散乱係数を有することを特徴とする。このように、複数のラマン増幅用光ファイバを、上記したように互いに異なる波長分散値を有すると同時に、レイリー散乱係数についても異なる値を有するものとすることによって、増幅器での伝送品質の劣化の抑制とともに、その雑音特性をも向上することができる。

【0023】このとき、複数のラマン増幅用光ファイバのうち、最も小さいレイリー散乱係数を有するラマン増幅用光ファイバが、最も入力端側の位置に設置されることが好ましい。

【0024】入力端側にレイリー散乱係数が大きいラマン増幅用光ファイバを設置する構成とした場合、入力端側で二重レイリー散乱によって生じる雑音光が大きくなるとともに、その大きい雑音光が後段の他のラマン増幅用光ファイバによって光増幅されることとなる。これに対して、レイリー散乱係数が小さく雑音特性が優れた光ファイバを入力端側に設置する構成とすることによって、増幅器内の光伝送路全体としての雑音特性を向上することができる。

【0025】また、複数のラマン増幅用光ファイバのそれぞれの長さが、 5 km 以下であることが好ましい。このように、ラマン増幅用光ファイバの長さを極力短くすることによって、非線型光学効果による信号光の伝送品質の劣化、及び雑音光の発生をとともに低減することができる。

【0026】また、複数のラマン増幅用光ファイバの少なくとも1つは、励起光の波長での実効断面積が $15 \mu\text{m}^2$ 以下であることを特徴とする。

【0027】さらに、複数のラマン増幅用光ファイバのうち、最も大きい非線型定数を有するラマン増幅用光フ

アイバが、励起光供給手段から励起光が供給される位置に最も近い位置に設置されていることを特徴とする。

【0028】ラマン増幅用光ファイバの実効断面積、非線型定数、またはその両者にそれぞれ上記した条件を適用することによって、誘導ラマン散乱によるラマン増幅の効率を高めて、増幅器のラマン利得を向上することができる。また、ラマン増幅器の全体として必要なラマン利得を確保するためのラマン増幅用光ファイバの長さが短くなるなど、ラマン増幅用光ファイバで生じる雑音光や伝送品質の劣化を低減することが可能となる。

【0029】また、本発明による光伝送システムは、信号光が伝送される光ファイバを用いて構成された光伝送路を有するとともに、光伝送路を伝送される信号光を中継する中継局内に、上記したラマン増幅器が設置されていることを特徴とする。

【0030】光伝送システムの中継局に設置される集中定数型の光増幅器として、上記の構成を有するラマン増幅器を用いることによって、信号光の伝送品質の劣化が抑制されて、送信局から受信局へと確実に信号光を伝送可能な光伝送システムを実現することができる。

【0031】

【発明の実施の形態】以下、図面とともに本発明によるラマン増幅器及びそれを用いた光伝送システムの好適な実施形態について詳細に説明する。なお、図面の説明においては同一要素には同一符号を付し、重複する説明を省略する。また、図面の寸法比率は、説明のものと必ずしも一致していない。

【0032】図1は、本発明によるラマン増幅器の一実施形態を示す構成図である。本ラマン増幅器1は、光伝送システムの中継局などに設置される集中定数型の光増幅器であり、2つのラマン増幅用光ファイバ11、12と、2つの励起光源ユニット21、22とを備えて構成されている。

【0033】ラマン増幅用光ファイバ11と12とはそれぞれ、互いに異なる波長分散値を有する石英系の光ファイバからなる。また、これらのラマン増幅用光ファイバは、ラマン増幅器1の入力端1aから出力端1bに向けて、ラマン増幅用光ファイバ11、12の順で直列に接続されている。

【0034】この2つのラマン増幅用光ファイバ11、12を用いた構成によって、信号光を伝送するとともに、励起光が供給されているときに、所定の増幅波長帯域内にある信号光を励起光によってラマン増幅するためのラマン増幅器1内の光伝送路（光ファイバ線路）が形成されている。また、ラマン増幅用光ファイバ11、12のそれぞれの波長分散値の組合せによって、ラマン増幅される信号光への分散の累積や信号光の零分散近傍での伝送を低減するなど、所定の条件を満たすように、ラマン増幅器1内の光伝送路での波長分散が制御される。

【0035】ラマン増幅用光ファイバ11、12の後方には、それぞれ光アイソレータ41、42が設置されている。光アイソレータ41、42のそれぞれは、光を順方向（図1中に示した矢印の方向）へと通過させるが、逆方向へは通過させないものである。すなわち、光アイソレータ41は、ラマン増幅用光ファイバ11から到達した光をラマン増幅用光ファイバ12へと通過させるが、逆方向へは光を通過させない。また、光アイソレータ42は、ラマン増幅用光ファイバ12から到達した光を出力端1bへと通過させるが、逆方向へは光を通過させない。

【0036】ラマン増幅用光ファイバ11、12への励起光は、励起光供給手段である励起光源ユニット21、22によってそれぞれ供給される。励起光源ユニット21、22は、ラマン増幅用光ファイバ11、12と光アイソレータ41、42との間にそれぞれ設けられた光合波器31、32を介して、ラマン増幅器1内の光伝送路に接続されている。

【0037】ここで、光合波器31、32は、励起光源ユニット21、22から供給されて到達した励起光を、前方のラマン増幅用光ファイバ11、12へ向けて逆方向にそれぞれ通過させる。また、ラマン増幅用光ファイバ11、12から到達した信号光を、光アイソレータ41、42へ向けて順方向にそれぞれ通過させる。これによって、本ラマン増幅器1は、後方励起（逆方向励起）の光増幅器として構成されている。

【0038】図1においては、ラマン増幅用光ファイバ11へと励起光を供給する励起光源ユニット21について、その具体的な構成の一例を図示してある。本実施形態においては、6つの励起光源211a、211b、212a、212b、213a、及び213bが用いられている。なお、励起光源ユニット22については、その具体的な構成の図示を省略しているが、励起光源ユニット21と同様の構成のものが用いられている。

【0039】励起光源ユニット21の6つの励起光源のうち、励起光源211a及び211bは同一の波長 λ_1 の光を出力するものである。励起光源211a及び211bからの光は、偏波合成器211cによって合成されて、偏波について均一な波長 λ_1 の励起光が生成される。同様に、励起光源212a及び212bは同一の波長 λ_2 （ $\lambda_2 \neq \lambda_1$ ）の光を出力し、それらは偏波合成器212cによって合成されて、偏波について均一な波長 λ_2 の励起光が生成される。また、励起光源213a及び213bは同一の波長 λ_3 （ $\lambda_3 \neq \lambda_1, \lambda_2$ ）の光を出力し、それらは偏波合成器213cによって合成されて、偏波について均一な波長 λ_3 の励起光が生成される。

【0040】そして、偏波合成器211c、212c、及び213cでそれぞれ合成された波長 λ_1 、 λ_2 、及び λ_3 の光は、波長合成器214において合成されて3つ

の波長成分を有する励起光とされ、光合波器31を介してラマン増幅用光ファイバ11へと供給される。

【0041】なお、励起光源ユニットの構成については、ラマン増幅器に要求される増幅波長帯域などに応じて、励起光の波長や励起光源の個数などを適宜設定することが好ましい。具体的には、励起光源ユニットからラマン増幅用光ファイバへと供給される励起光の波長については、通常、信号光の波長よりも0.1 μm 程度短い波長が用いられる。また、励起光源の個数については、そのラマン増幅器での増幅波長帯域内の各波長において光増幅が可能となるように、必要な個数（必要な波長数）の励起光源が用いられる。例えば、1波長の励起光によって増幅波長帯域の全体での光増幅が可能な場合には、励起光は1波長成分のみを有するものであっても良い。

【0042】上記したラマン増幅器1においては、複数のラマン増幅用光ファイバ、図1においては2つのラマン増幅用光ファイバ11、12、を直列に接続して増幅器1内での光伝送路を構成するとともに、それらの波長分散値をそれぞれ異なる値としている。この構成によれば、ラマン増幅用光ファイバ11、12のそれぞれでの波長分散値の組合せを利用して、増幅器1内での波長分散を制御して、信号光への分散の累積や零分散近傍での伝送などの、信号光の伝送上好ましくない条件の発生を防止することが可能となる。これによって、非線型光学効果による増幅器内での信号光の伝送品質の劣化が抑制されるラマン増幅器が実現される。

【0043】ここで、増幅器1内の光伝送路での信号光への分散の累積に関しては、増幅波長帯域内の少なくとも一部の波長帯域において、ラマン増幅用光ファイバ11、12での波長分散を入力端1aから出力端1bまで累積した分散値の絶対値を、0.5ps/nm以下の範囲内とすることが好ましい。これは、分散値の増幅波長帯域内での最小値を0.5ps/nm以下とすることに相当する。

【0044】また、増幅波長帯域内の全体の波長帯域において、波長分散を入力端1aから出力端1bまで累積した分散値の絶対値を、5.0ps/nm以下の範囲内とすることが好ましい。これは、分散値の増幅波長帯域内での最大値を5.0ps/nm以下とすることに相当する。

【0045】ラマン増幅器1内の光伝送路全体としての分散値となる、各ラマン増幅用光ファイバ11、12を通して累積された分散値を、上記の範囲内とすることによって、それぞれ波長分散値の異なる2つのラマン増幅用光ファイバ11、12が接続された光伝送路の全体として波長分散が十分に補償された構成となる。したがって、自己位相変調（SPM: Self Phase Modulation）や群速度分散（GVD: Group Velocity Dispersion）の発生による信号光の伝送品質の劣化が抑制される。

【0046】また、増幅器1内の光伝送路での信号光の零分散近傍での伝送に関しては、2つのラマン増幅用光ファイバ11、12は、互いに異なる符号の波長分散値（一方が正、他方が負の波長分散値）を有する構成とすることが好ましい。

【0047】このように、逆符号の波長分散値を有するラマン増幅用光ファイバ11、12を接続して光伝送路を構成すれば、ラマン増幅用光ファイバ11、12での波長分散値の絶対値がそれぞれある程度の大きさの値であっても、逆符号の波長分散値の組合せによって、増幅器1内の光伝送路の全体として波長分散を補償することができる。これによって、信号光の零分散近傍での伝送を極力避けることが可能となり、交差位相変調（XPM: Cross Phase Modulation）や四光波混合（FWM: Four Wave Mixing）の発生による信号光の伝送品質の劣化が抑制される。

【0048】図1に示したラマン増幅器におけるラマン増幅用光ファイバの組合せ等について、さらに具体的に説明する。図2は、図1に示したラマン増幅器内の光ファイバ伝送路における波長分散の一例について模式的に示すグラフである。なお、図2においては、ラマン増幅器1の構成を簡略化してラマン増幅用光ファイバ11及び12のみを示し、励起光源ユニット21、22、光合波器31、32、及び光アイソレータ41、42については、図示を省略している。また、図2中の点1cは、ラマン増幅用光ファイバ11と12とが互いに接続される中間点を示している。

【0049】図2に示した例においては、入力端1a側のラマン増幅用光ファイバ11として、正の波長分散値を有する光ファイバが適用されている。これにより、入力端1aから中間点1cに向けて、伝送距離とともに分散値が累積的に増加し、中間点1cにおいて、約30 ps/nmの分散値となっている。

【0050】一方、出力端1b側のラマン増幅用光ファイバ12としては、負の波長分散値を有する光ファイバが適用されている。これにより、中間点1cで約30 ps/nmとなっていた分散値が、出力端1bに向けて伝送距離とともに累積的に減少し、出力端1bにおいて、ほぼ0 ps/nmの分散値となる。より具体的には、その絶対値が所定の値以下（例えば0.5 ps/nm以下、あるいは5.0 ps/nm以下）の範囲内の分散値となるように波長分散が補償される。このような構成により、上記したように非線型光学効果による信号光の伝送品質の劣化が抑制されるラマン増幅器1が得られる。

【0051】図3に、図2に示した構成のラマン増幅器を実現するためのラマン増幅用光ファイバの具体例を、その屈折率プロファイルによって示す。図3に示した光ファイバは、SiO₂にGeO₂が添加された比屈折率差 Δn_1 のコア領域61と、SiO₂にFが添加された比屈折率差 Δn_2 のクラッド領域62とを有して構成されて

いる。

【0052】上記した構成からなる光ファイバにおいて、純SiO₂を0%としたコア領域61及びクラッド領域62の比屈折率差を $\Delta n_1=2.9\%$ 、 $\Delta n_2=-0.4\%$ として、ラマン増幅用光ファイバ11及び12にそれぞれ適用した。ここで、比屈折率差以外の光ファイバの構成については、それぞれの光ファイバで異なる構成とした。

【0053】具体的には、前段のラマン増幅用光ファイバ11では、コア径を4.8 (μm)、波長1.55 μm での波長分散を4.3 (ps/nm/km)、波長1.55 μm での実効断面積を10.8 (μm^2)、非線型定数を20.4 (1/W/km)とした。

【0054】また、後段のラマン増幅用光ファイバ12では、コア径を4.0 (μm)、波長1.55 μm での波長分散を-9.0 (ps/nm/km)、波長1.55 μm での実効断面積を9.9 (μm^2)、非線型定数を22.3 (1/W/km)とした。

【0055】以上の構成からなるラマン増幅用光ファイバ11及び12を用いれば、図2に示した波長分散となるように、ラマン増幅器1を構成することができる。なお、それぞれの波長分散値から、中間点1cでの分散値が約30 ps/nmとなる図2の場合には、ラマン増幅用光ファイバ11の長さは約6.98 km、ラマン増幅用光ファイバ12の長さは約3.33 kmとなる。

【0056】ここで、増幅波長帯域内の全体の波長帯域において、波長分散を入力端1aから任意の位置まで累積した分散値の絶対値を、各位置に対して30 ps/nm以下の範囲内とすることが好ましい。これは、増幅器1内の光伝送路上の各位置での分散値の最大値を、図2に示した例のように、30 ps/nm以下とすることに相当する。

【0057】入力端1aから出力端1bまでの光伝送路上で分散値が過度に大きくなる位置が存在すると、光伝送路全体としての波長分散の補償にかかわらず、SPMやGVDによる信号光の伝送品質の劣化が発生する原因となる。これに対して、光伝送路上の各位置に対しても分散値に一定の条件を課することによって、信号光の伝送中での伝送品質の劣化を抑制することができる。なお、この条件は、図1及び図2のように2つのラマン増幅用光ファイバ11、12を用いている場合には、それらが接続される中間点1cまでに累積される波長分散値を30 ps/nm以下とすることによって達成される。

【0058】また、ラマン増幅用光ファイバ11、12のそれぞれにおける分散スロープ値を、-0.5 ps/nm²/km以上0.1 ps/nm²/km以下の範囲内とすることが好ましい。

【0059】例えば、上記した具体例の光ファイバ等によってラマン増幅器1を構成した場合、波長1.55 μm で波長分散の補償が可能となるが、それぞれの分散ス

ローブ値の絶対値が大きいと、増幅波長帯域内で波長 1.55 μm から離れた波長帯域における波長分散の補償が困難となる。これに対して、上記のように分散スローブ値を十分に小さい値としておけば、増幅波長帯域の全体に対して、十分に波長分散を補償することが可能となる。

【0060】また、増幅波長帯域内の全体の波長帯域において、ラマン増幅用光ファイバ 11、12 のそれぞれの波長分散値の絶対値を、所定の波長分散下限値以上として、0 ps/nm 近傍を除いておくことが好ましい。これによって、増幅器 1 内の光伝送路で、零分散近傍で伝送されることによる信号光の伝送品質の劣化を確実に防止することができる。なお、波長分散下限値については、例えば、絶対値が 0.5 ps/nm/km 以上とすることが好ましい。

【0061】さらに、ラマン増幅用光ファイバ 11、12 のそれぞれの長さを、5 km 以下とすることが好ましい。このように、ラマン増幅用光ファイバ 11、12 の長さ、したがって増幅器 1 内の光伝送路の長さを極力短くすることによって、非線型光学効果による信号光の伝送品質の劣化をより低減することができる。また、非線型光学効果とは別に伝送品質の劣化の原因となる雑音光の発生についても、ともに低減される。

【0062】また、複数のラマン増幅用光ファイバとして用いる光ファイバの構成については、その少なくとも 1 つを、ラマン増幅用の励起光の波長における実効断面積を 15 μm^2 以下とすることが好ましい。

【0063】あるいは、複数のラマン増幅用光ファイバのうち、最も大きい非線型定数を有するラマン増幅用光ファイバを、励起光源ユニットから励起光が供給される位置に最も近い位置に設置することが好ましい。

【0064】ラマン増幅用光ファイバとして適用する光ファイバの実効断面積、非線型定数、またはその両者にそれぞれ上記した条件を課することによって、増幅器のラマン利得を向上することができる。

【0065】図 4 に、波長 1.48 μm の励起光を用いた場合の、波長帯域 1525 nm ~ 1625 nm でのラマン利得係数 g_R のグラフを示す。ここで、グラフ F は、通常の 1.3 μm 零分散シングルモードファイバによるラマン利得係数 g_R を示している。一方、グラフ G は、励起光波長における実効断面積が 10 μm^2 で高非線型性の光ファイバを用いた場合のラマン利得係数 g_R を示している。

【0066】これらのグラフ F 及び G より、励起光波長での実効断面積が小さく、かつ非線型定数大きい光ファイバを用いることによって、誘導ラマン散乱によるラマン増幅の効率を向上させて、増幅器での高ラマン利得を得ることが可能となることがわかる。また、このとき、ラマン増幅器に対して必要とされているラマン利得を確保するためのラマン増幅用光ファイバの長さを短く

することができるなど、ラマン増幅用光ファイバで生じる雑音光や伝送品質の劣化についても、さらに低減することが可能となる。

【0067】なお、非線型定数が最大のラマン増幅用光ファイバを、励起光源ユニットから励起光が供給される位置に最も近い位置に設置することについては、図 1 に示すように、各ラマン増幅用光ファイバ 11、12 が励起光源ユニット 21、22 に対して同様の位置関係にある場合には、任意の光ファイバを非線型定数大きいものとして良い。また、図 1 に示した構成において、前方の励起光源ユニット 21 が設置されず、後方の励起光源ユニット 22 がラマン増幅用光ファイバ 11 及び 12 に対する共通の励起光供給手段となる場合には、励起光源ユニット 22 に近いラマン増幅用光ファイバ 12 に、非線型定数の大きい光ファイバが適用される。

【0068】また、複数のラマン増幅用光ファイバからなる光伝送路での雑音特性については、複数のラマン増幅用光ファイバとして、互いに異なるレイリー散乱係数を有する光ファイバを用いることが好ましい。これによって、波長分散値の組合せによる信号光の伝送品質の劣化の抑制とともに、レイリー散乱係数の組合せを利用して、二重レイリー散乱による雑音光の発生及びその増幅を低減して、光伝送路の雑音特性をも向上することができる。

【0069】この場合の光伝送路の構成については、最も小さいレイリー散乱係数を有するラマン増幅用光ファイバを、最も入力端側の位置に設置することが好ましい。例えば、図 1 に示した構成のラマン増幅器 1 においては、前段のラマン増幅用光ファイバ 11 として、レイリー散乱係数が小さく雑音特性が重視された光ファイバ（例えば Ge 低濃度コアの光ファイバ）を適用する。一方、後段のラマン増幅用光ファイバ 12 として、ラマン利得などの他の特性が重視された光ファイバを適用する。

【0070】入力端 1a 側のラマン増幅用光ファイバ 11 にレイリー散乱係数大きいものを配置した場合、前段のラマン増幅用光ファイバ 11 で大きい雑音光が生成されるとともに、後段のラマン増幅用光ファイバ 12 でその雑音光が光増幅されて、結果として出力信号光における雑音光強度が増大してしまう。これに対して、上記のように前段に雑音特性を重視した光ファイバを、また、後段にラマン利得などを重視した光ファイバを配置する構成とすれば、増幅器 1 の全体としての雑音特性を向上することができる。

【0071】次に、上記したラマン増幅器を用いた本発明による光伝送システムについて説明する。図 5 は、図 1 に示したラマン増幅器を用いた光伝送システムの一実施形態を示す構成図である。

【0072】本実施形態の光伝送システムは、送信局 T と受信局 R との間の光伝送路（光ファイバ線路）上に、

10

20

30

40

50

送信局 T 側から順に 2 つの中継局 A、B が設けられて構成されている。これらの中継局 A、B は、光伝送路を伝送される信号光の中継するためのものである。そして、中継局 A 及び B の内部には、それぞれ図 1 に示した構成を有するラマン増幅器 1 a 及び 1 b が設置されている。

【0073】このように、図 1 に示した構成によるラマン増幅器 1 a、1 b を、光伝送システムの中継局 A、B に設置される集中定数型の光増幅器として利用することによって、信号光の伝送品質の劣化が抑制されて、送信局 T から受信局 R へと確実に信号光を伝送可能な光伝送システムを実現することができる。

【0074】なお、2 つの中継局 A 及び B の間の光伝送路 C については、必要な分散制御等がされた光伝送路として構成されていることが好ましい。また、この光伝送路 C 中に、同様にラマン増幅器等が備えられた他の中継局がさらに設けられていても良い。

【0075】本発明によるラマン増幅器、及びそれを用いた光伝送システムは、上記した実施形態に限られるものではなく、様々な変形が可能である。

【0076】図 6 及び図 7 は、それぞれラマン増幅器の変形例として他の実施形態を示す構成図である。このうち、図 6 に示したラマン増幅器では、図 1 に示した構成に対して、さらに 2 つの励起光源ユニット 2 3、2 4 が設置されている。これらの励起光源ユニットのうち、励起光源ユニット 2 3 は、入力端 1 a とラマン増幅用光ファイバ 1 1 との間に設けられた光合波器 3 3 を介して光伝送路に接続されて、ラマン増幅用光ファイバ 1 1 へと順方向に励起光を供給している。また、励起光源ユニット 2 4 は、光アイソレータ 4 1 とラマン増幅用光ファイバ 1 2 との間に設けられた光合波器 3 4 を介して光伝送路に接続されて、ラマン増幅用光ファイバ 1 2 へと順方向に励起光を供給している。これによって、図 6 のラマン増幅器 1 は、双方向励起の光増幅器として構成されている。

【0077】また、図 7 に示したラマン増幅器では、励起光源ユニットとしては、ラマン増幅用光ファイバ 1 1 の前方の励起光源ユニット 2 3 と、ラマン増幅用光ファイバ 1 2 の後方の励起光源ユニット 2 2 とが設置されている。また、ラマン増幅用光ファイバ 1 1 と光アイソレータ 4 1 との間、及び光アイソレータ 4 1 とラマン増幅用光ファイバ 1 2 との間には、それぞれ光合分波器 3 5、3 6 が設置されている。

【0078】これらの光合分波器 3 5、3 6 は、いずれも励起光源ユニット 2 2、2 3 から供給される励起光の波長の光を合分波するものである。また、光合分波器 3 5 及び 3 6 の間には、励起光源ユニット 2 2、2 3 からの励起光を迂回して通過させるバイパス路となる光伝送路 3 7 が設けられている。これによって、図 7 のラマン増幅器 1 は、励起光源ユニット 2 2 及び 2 3 のそれぞれからの励起光が、2 つのラマン増幅用光ファイバ 1 1、

1 2 の両方にそれぞれ供給される双方向励起の光増幅器として構成されている。

【0079】これらの変形例以外にも、様々な構成の変更が可能である。例えば、励起光源ユニットについては、2 つのラマン増幅用光ファイバに対して単一の励起光源ユニットのみを設置しても良い。また、光アイソレータ 4 1、4 2 については、不要な場合は設置を省略しても良い。あるいは、光アイソレータ及び光合波器を集積化して、損失を低減する構成とすることも可能である。

【0080】また、直列に接続される複数のラマン増幅用光ファイバの個数については、上記した 2 つの場合に限らず、3 つ以上のラマン増幅用光ファイバを用いても良い。この場合、ラマン増幅器の構成はやや複雑となるが、波長分散値やレイリー散乱係数などの組合せの自由度が増すこととなるので、それらの諸特性の制御性が向上される。

【0081】また、ラマン増幅器内の光ファイバ伝送路における波長分散についても、図 2 に示した構成に限らず、他の特性との関係などに応じて、様々な構成とすることが可能である。例えば、図 2 においては、前段のラマン増幅用光ファイバ 1 1 が正の波長分散値、後段のラマン増幅用光ファイバ 1 2 が負の波長分散値を有する構成とされている。これに対して、図 8 に示すように、前段のラマン増幅用光ファイバ 1 1 が負の波長分散値、後段のラマン増幅用光ファイバ 1 2 が正の波長分散値を有する構成とすることも可能である。

【0082】波長分散以外の各構成条件、例えばラマン増幅用光ファイバの非線型定数、レイリー散乱係数、分散スロープ、及び光ファイバの長さ等についても、それぞれの条件の相関や、個々のラマン増幅器に対して要求される具体的な特性条件などに応じて、適宜その組合せを選択することが好ましい。

【0083】

【発明の効果】本発明によるラマン増幅器及びそれを用いた光伝送システムは、以上詳細に説明したように、次のような効果を得る。すなわち、互いに異なる波長分散値を有する複数のラマン増幅用光ファイバを直列に接続して構成された集中定数型のラマン増幅器によれば、増幅器内の光伝送路での波長分散を波長分散値の組合せによって制御して、信号光への分散の累積や零分散近傍での伝送を低減することが可能となる。これによって、非線型光学効果などによる信号光の伝送品質の劣化が抑制されるラマン増幅器が実現される。

【0084】このような構成を有するラマン増幅器では、増幅器モジュール内で波長分散が制御されるため、上記した特性の向上とともに、その中継局などへの適用が容易である。また、特性制御の自由度の高さから、各用途に適した様々な特性のラマン増幅器を提供することが可能となる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】 ラマン増幅器の一実施形態を示す構成図である。

【図 2】 図 1 に示したラマン増幅器内の光伝送路における波長分散の一例を示すグラフである。

【図 3】 ラマン増幅器に適用されるラマン増幅用光ファイバの構成を示す図である。

【図 4】 ラマン増幅用光ファイバにおけるラマン利得係数について示すグラフである。

【図 5】 図 1 に示したラマン増幅器を用いた光伝送システムの一実施形態を示す構成図である。

【図 6】 ラマン増幅器の他の実施形態を示す構成図であ

る。

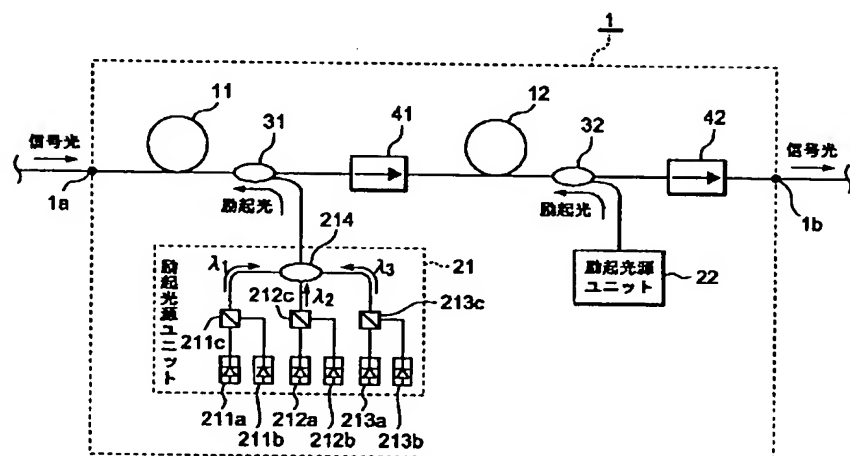
【図 7】 ラマン増幅器の他の実施形態を示す構成図である。

【図 8】 図 1 に示したラマン増幅器内の光伝送路における波長分散の他の例を示すグラフである。

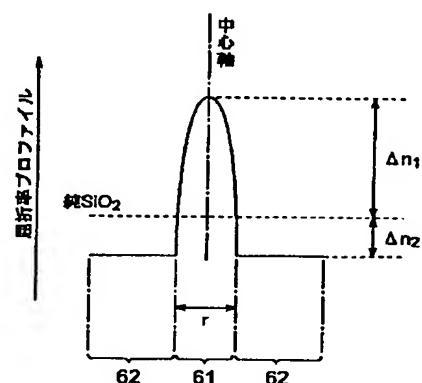
【符号の説明】

1…ラマン増幅器、1a…入力端、1b…出力端、1c…中間点、11、12…ラマン増幅用光ファイバ、21～24…励起光源ユニット、31～34…光合波器、35、36…光合分波器、37…光伝送路、41、42…光アイソレータ。

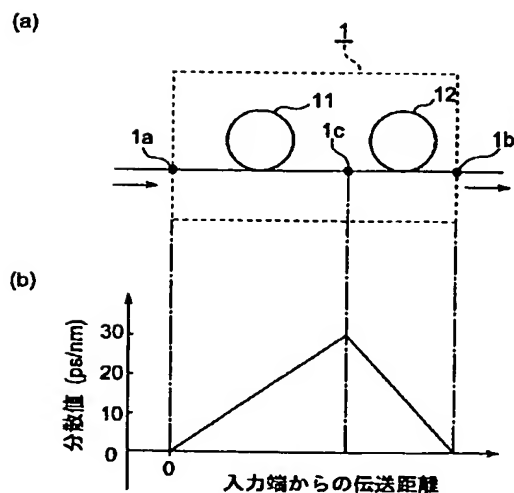
【図 1】



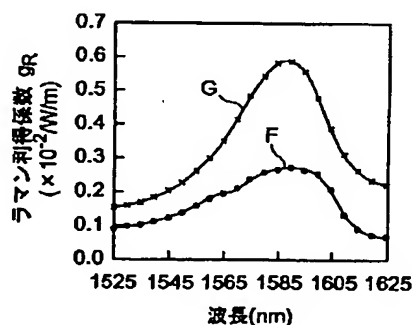
【図 3】



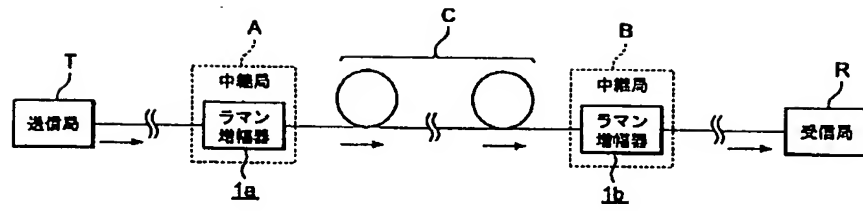
【図 2】



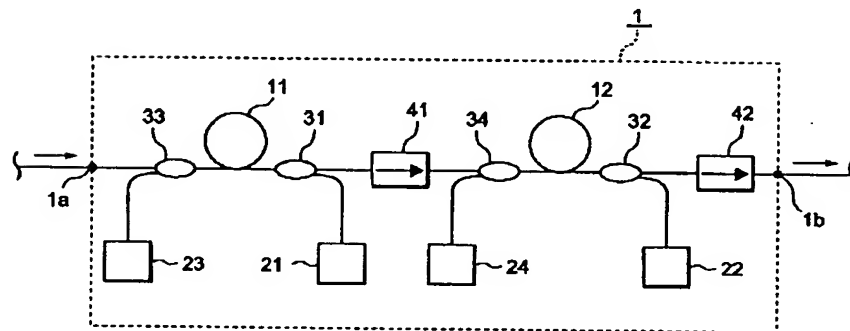
【図 4】



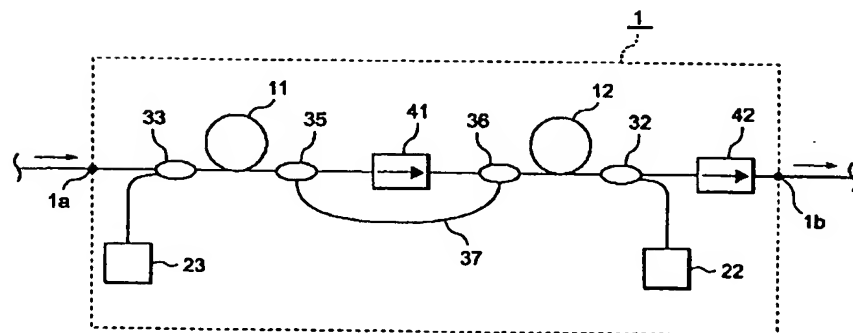
【図 5】



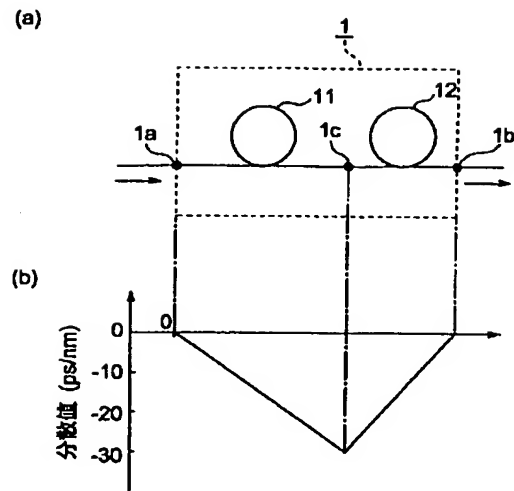
【図 6】



【図 7】



【図 8】



フロントページの続き

(51) Int. Cl.⁷
H04B 10/16

識別記号

F I

テーマコード(参考)

(72) 発明者 平野 正晃
神奈川県横浜市栄区田谷町1番地 住友電
気工業株式会社横浜製作所内

Fターム(参考) 2K002 AA02 AB30 BA01 CA15 DA10
GA10 HA23
5F072 AB09 AK06 JJ05 JJ09 KK30
QQ07 YY17
5K002 AA06 CA01 CA13